

Alterungsuntersuchung an intrinsischen Hybridverbindungen

K. Lippky, M. Mund, S. Hartwig, K. Dilger

Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik

k.lippky@tu-braunschweig.de

Abstract

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen die Auswirkungen eines Klimawechseltests an einer wärmeunterstützten Pressfügeverbindung zwischen thermoplastischen glasfaserverstärkten Geweben und einem verzinkten Stahlfügeteil. Zur Steigerung der Haftung zwischen den beiden Materialien wird das Stahlfügeteil mittels eines Lasers vorbehandelt. Hierzu werden eine niedrige, mittlere und hohe Vorbehandlungsintensität anhand von drei unterschiedlichen Parameterkombinationen definiert. Die Untersuchung der Oberflächen zeigen, dass durch das Aufschmelzen der Stahloberfläche unterschiedliche Oberflächentopographien entstehen. Mit der höchsten hier betrachteten Vorbehandlungsintensität, welche auch die höchste gemittelte Rauheit besitzt, lassen sich mit der gewählten Materialkombination im ungealterten Zustand Zugscherfestigkeiten von bis zu 25 MPa erreichen. Durch die Klimawechselalterung nach PV1200 lassen sich in Abhängigkeit der gewählten Laservorbehandlung im besten Fall auch nach 100 Zyklen keine Einschränkungen der erzeugten Pressfügeverbindung feststellen.

1 Einleitung und Stand der Technik

Die Vorteile, die sich durch den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) im Bereich von Leichtbaustrukturen ergeben sind hinreichend bekannt [1]. Um den Einsatz von FVK auch im Bereich der Großserienanwendung zu erhöhen kommen vermehrt Hybridstrukturen zum Einsatz [2]. Da sich durch die Kombination der Materialien die Kosten beim Einsatz von monolithischen FVK Strukturen reduzieren lassen und eine gesteigerte Performance im Vergleich zu einem monolithischen Stahlbauteil erreicht werden kann [2, 3]. Dadurch, dass der FVK das metallische Gegenstück nicht vollständig substituiert, sinken die Kosten gegenüber einem monolithischen FVK-Bauteil. In den letzten Jahren hat sich für den Bau solcher Hybridstrukturen der Einsatz von thermoplastischen (TP) FVK als zielführend herausgestellt, da sich durch den

Einsatz dieser Materialien eine intrinsische Bauteilherstellung (integrierte Umform- und Fügeprozess) erreichen lässt [4–6]. Dieser Herstellungsprozess basiert auf dem wärmeunterstützten Pressfügen, welches das direkte Anbinden der TP Matrix an einen metallischen Fügepartner bezeichnet [7]. Für die Herstellung von Strukturbauteilen sind darüber hinaus gewisse Anforderungen an die Bauteilfestigkeit gegeben, weshalb eine Vorbehandlung der Fügeteile beim Pressfügen unerlässlich ist [8]. Hierfür kommen die vom Kleben bekannten Vorbehandlungstechniken, wie zum Beispiel das Sandstrahlen, die Plasmavorbehandlung oder die Vorbehandlung mit Hilfe eines Lasers in Frage. Die Plasmavorbehandlung ist aufgrund des Aufschmelzens der thermoplastischen Grenzschicht in der Wirkung eingeschränkt. Das Sandstrahlen als Prozess ist in der Regel mit einer Vor- und Nachreinigung verbunden, was den Prozess aufwendig macht [9]. Daher wird die Laservorbehandlung für diese Untersuchungen ausgewählt. In der Vergangenheit wurde diese zur Entfettung von Fügeteilen [9], dem Entfernen von Aluminiumoxidschichten [10] und der Strukturierung von Oberflächen eingesetzt [11, 12]. Die Strukturierung mit Hilfe einer Laservorbehandlung zeigte dabei z. B. gute Resultate beim Pressfügen [12, 13]. Neben der Erfüllung der Festigkeitsanforderungen müssen im Mobilitätssektor aber auch Anforderungen hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit einer Verbindung erfüllt werden. Hierbei ist unter anderem die Klimawechselalterung von Interesse [8]. So wurden unter anderem Untersuchungen zur Klimawechselalterung von Pressfügeverbindungen in Kombination mit einer sandgestrahlten Oberfläche durchgeführt [14]. Hierbei zeigte sich im Vergleich zu strukturellen Klebungen ein stabileres Alterungsverhalten von Pressfügeverbindungen insbesondere bei längeren Auslagerungsdauern (240 Zyklen – PV1200). Da bisher keine eingehenden Untersuchungen von laservorbehandelten Pressfügeverbindungen unter einer Klimawechselbelastung existieren, soll diese Fragestellung nun betrachtet werden.

2 Verwendete Materialien und Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Versuchsmaterialien sowie die Methoden zur Oberflächenvorbehandlung, Oberflächenanalyse (Rauheitsmessung und Rasterelektronenmikroskopie), Probenherstellung und Prüfung sowie die Klimawechselalterung vorgestellt.

2.1 Material

Für die Untersuchungen kam ein verzinkter Stahl (HX340 LAD Z100 MB) zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen mikrolegiertes Blech, für Anwendungen im Ka-

rosseriebereich. Für die Versuche ist darüber hinaus die Zinkschicht mit einer Zinkauflage von 100 g/m^2 von Interesse, da diese eine zusätzliche Passivierung des metallischen Fügeteils während des Klimawechseltest sicherstellt. Das Stahlfügeteil hat eine Materialstärke von 1,5 mm. Neben dem Stahlfügeteil kommt als weiterer Fügepartner ein glasfaserverstärktes Polyamid 6 von zwei unterschiedlichen Herstellern zum Einsatz. Im Verlauf der Arbeit werden die beiden Herstellervarianten mit TP1a und TP2 gekennzeichnet. Bei dem FVK handelt es sich in beiden Fällen um einen Gewebeaufbau (Körper 50:50) mit einer Stärke von 2 mm und einem Fasermassengehalt von circa 65-68 Gew.-%.

2.2 Oberflächenvorbehandlung

Alle Fügeteile wurden vor der weiteren Verwendung mit Isopropanol gereinigt um etwaige Kontaminationen der Oberflächen zu entfernen. Die metallischen Fügeteile wurden im Anschluss an diese Reinigung mit Hilfe eines Lasers vorbehandelt. Hierzu kam ein redEnergy G4H Type der Fa. SPI Lasers UK Limited (Southampton, Großbritannien) zum Einsatz. Der Laser hat eine mittlere Leistung von circa 70 W und eine Wellenlänge von $1062 \pm 2 \text{ nm}$. Für die Oberflächenvorbehandlung der gereinigten Stahloberfläche wurden drei verschiedene Vorbehandlungsparameter verwendet. Diese zeichnen sich dabei durch eine niedrige, mittlere und hohe Vorbehandlungsintensität aus. Die Bearbeitungsstrategie der Oberfläche entsprach parallel angeordneten Linien, die genauen Spezifikationen der Parameter sind in *Tab. 1* dargestellt.

Tab. 1: Parametersätze für die Laservorbehandlung

Parameter	Frequenz [kHz]	Mittlere Leistung [W]	Pulsüberlapp X [%]	Pulsüberlapp Y [%]
L1	60	70	72	50
L2	60	70	72	95
L3	60	70	83	95

2.3 Bestimmung der Oberflächenrauheit

Zur Bestimmung der gemittelten Rautiefe (R_z) nach DIN EN ISO 4287 kam ein MarSurf M400 Tastschnittgerät der Fa. Mahr GmbH (Göttingen, Deutschland) zum Einsatz. Als Messlänge wurden 5,6 mm gewählt. Damit wurde die Probenoberfläche an drei verschiedenen Stellen quer zur Zugrichtung vermessen. Zur Absicherung der Ergebnisse erfolgten die Messungen darüber hinaus an mindestens drei Probenkörpern.

2.4 Rasterelektronenmikroskopische Betrachtung der Oberflächen

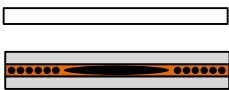
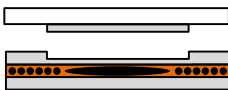
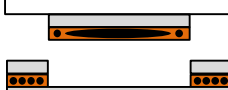
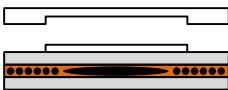







Als bildgebendes Verfahren wurde ein Rasterelektronenmikroskop (REM) (FEM Quanta FEG 650) der Fa. Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA) eingesetzt. Die Probenkörper für die REM-Aufnahmen wurden vor der Laservorbehandlung auf eine Größe von 15 x 25 mm zurechtgeschnitten, gereinigt und vorbehandelt um das Einschleusen in das REM zu erleichtern. Vor dem Einbringen der Probenkörper erfolgte zusätzlich noch ein Abblasen der Oberfläche mit Stickstoff um etwaige lose Anhaftungen zu entfernen, da diese den Everhart-Thornley-Detektor während einer Aufnahme beeinflussen könnten.

2.5 Herstellung und Prüfung von Zugscherproben

Die Zugscherproben gemäß DIN EN 1465:2009 wurden mit Hilfe eines Induktors zur Erwärmung des metallischen Fügeteils, welcher an die Universalprüfmaschine Zwicki 1 kN der Fa. Zwick Roell GmbH (Ulm, Deutschland) angeschlossen wurde hergestellt. Die Prüfmaschine stellte während des Fügeprozesses über eine Kraftregelung eine Anpresskraft von 150 N bereit. Durch das Nachregeln der Anpresskraft erfolgte ein Zustellen des Induktors bis zum Erreichen der gewünschten Einschmelztiefe von 0,1 mm. Als Fügtemperatur wurde im Vorfeld ein Temperaturkorridor von 230 bis 250 °C über einen festen Parametersatz am Induktionsgenerator bestimmt.

Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 1465:2009 auf einer Universalprüfmaschine (Modell 5966) der Fa. Instron (Illinois Tool Works Inc., Glenview, USA) mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min. Im Anschluss an die Zugscherversuche wurden die resultierenden Bruchbilder mit einer Kamera dokumentiert und bewertet. Die Bruchbildcharakterisierung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 10365:1995 (siehe *Tab. 2*).

Tab. 2: Bruchbildcharakterisierung von wärmeunterstützten Pressfügeverbindungen in Anlehnung an DIN EN ISO 10365:1995

Adhäsives Versagen	Kohäsives Versagen	Delaminationsversagen	Kohäsives Fügeteilversagen
AF	CF	DF	CSF
			
Keine Rückstände von TP Matrix am Metallteil	Rückstände von TP Matrix am Metallteil	Sichtbare Faserreste am Metallteil	Versagen durch Korrosion
			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Stahlfügeteil </div> <div style="text-align: center;">  TP Matrix +  Faserlage </div> </div>			

2.6 Klimawechsellagerung nach PV1200

Für die Alterung der Proben wurde der Klimawechseltest nach der Volkswagen Prüfvorschrift PV1200 gewählt. Bevor der Alterungstest durchgeführt wurde, wurden die Probekörper mit einer kathodischen Tauchlackierung passiviert um eine Korrosion des Fügeteils zu vermeiden. Der Klimawechseltest besteht aus zwei vierstündigen Abschnitten mit einem Konstantklima von -40 °C bzw. 80 °C / 80 rel. Feuchte. Zwischen diesen Zyklen befinden sich zwei Wechselkorridore in denen die Temperatur innerhalb von 2 h gesenkt bzw. angehoben wird. Ein Zyklus dauert somit 12 h. Um die Auswirkungen des PV1200 auf den Verlauf der erreichbaren Zugscherfestigkeit besser abschätzen zu können, wurden Proben nach 30, 60 und 100 Zyklen während der Alterung entnommen. Im Anschluss an die Probenalterung folgte eine Lagerung der Pro-

ben bei Raumklima für min. 7 Tage zur Homogenisierung der Probenkörper vor der Prüfung.

3 Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Versuchsergebnisse beginnt mit der Oberflächenanalyse, bevor auf die Ergebnisse der Zugscheruntersuchungen vor und nach einer Klimawechselalterung eingegangen wird.

3.1 Ergebnisse der Oberflächenanalyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Oberflächenanalyse der laservorbehandelten Metallsubstrate vorgestellt. Zu Beginn werden die quantitativen Ergebnisse der Rauheitsmessungen vorgestellt, bevor auf die qualitative Oberflächenanalyse mittels Rasterelektronenmikroskopie eingegangen wird.

Die Messungen der gemittelten Oberflächenrauheit ergaben auf einem gereinigten Substrat ein R_A von $1,09 \pm 0,05 \mu\text{m}$. Durch eine Laservorbehandlung der metallischen Oberfläche mit der geringsten Vorbehandlungsintensität L1 steigt die mittlere Rauheit auf $2,15 \pm 0,17 \mu\text{m}$. Eine weitere Steigerung der Intensität mit dem Parametersatz L2 führt zu keiner Steigerung der mittleren Rauheit ($2,22 \pm 0,53 \mu\text{m}$). Die höchste Vorbehandlungsintensität (L3) führt zu einem R_A von $6,16 \pm 0,45 \mu\text{m}$.

Die Oberflächenanalyse mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops zeigt für den Ausgangszustand eine Zinkschicht mit einer mittleren Zinkblume die keine ausgeprägten Strukturen auf der Oberfläche erkennen lässt (siehe *Abb. 1*). Eine Vorbehandlung der verzinkten Oberfläche mittels des Parametersatzes L1 führt zu einer Veränderung der Oberflächentopographie, wie Teil b) von *Abb. 1* zeigt. Es bilden sich wiederkehrende Strukturen aufgrund des wiederholten Aufschmelzens der Oberfläche durch die Wechselwirkung mit dem Laserstrahl aus.

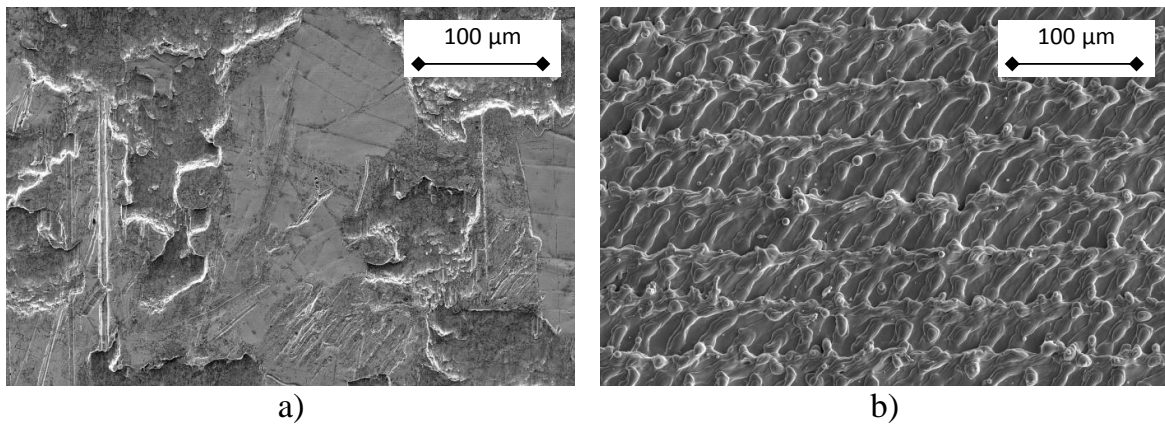


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberflächen im Ausgangszustand a) und nach der Vorbehandlung mit L1 b)

Eine Steigerung der Vorbehandlungsintensität durch einen größeren Pulsüberlapp in X-Richtung durch den Parametersatz L2 führt wiederum zu einer Veränderung der Oberflächentopographie (siehe *Abb. 2 a)*). Die wiederkehrenden Muster sind im Vergleich zur geringen Vorbehandlungsintensität feiner geworden. Eine weitere Steigerung der Vorbehandlungsintensität (L3) führt zu einer gröber strukturierten Oberfläche die nach der optischen Beurteilung der REM-Aufnahmen ein hohes Potential für mechanische Adhäsion bereitstellt (siehe *Abb. 2 b)*).

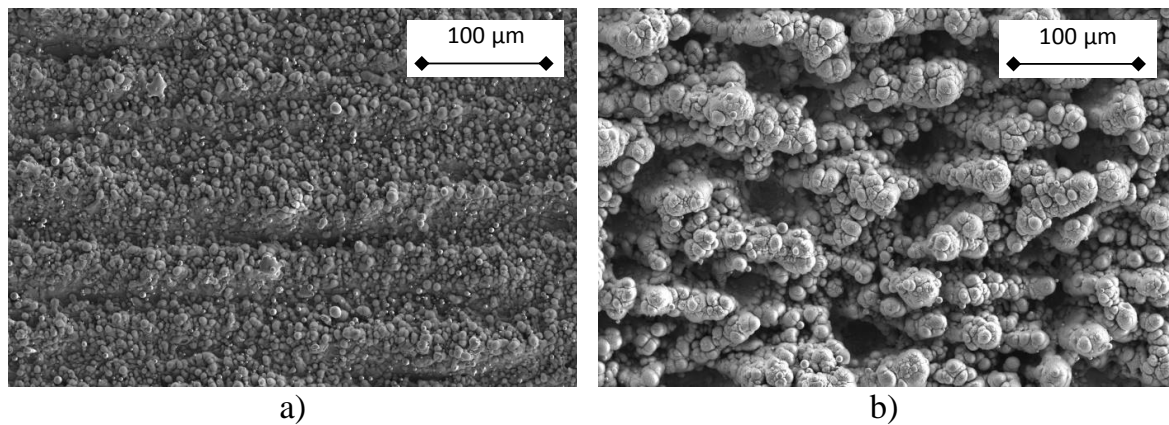


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberflächen im nach der Vorbehandlung mit L2 a) und L3 b)

Nach der Vorstellung der Ergebnisse zu Oberflächenanalytik werden im Folgenden die Ergebnisse der Alterungsuntersuchungen vorgestellt.

3.2 Ergebnisse der Klimawechselalterung von pressgefügtten Verbindungen

Der durchgeführte Klimawechseltest der Zugscherproben zeigt für das TP1a Material nach dem Durchlauf der KTL-Trocknung für niedrige und mittlere Vorbehandlungsintensitäten nahezu gleiche Festigkeiten (L1_TP1a: $14,5 \pm 1,8$ MPa; L2_TP1a: $15,9 \pm 1,2$ MPa) (Abb. 3). Die höchste Vorbehandlungsintensität (L3) erreicht eine Festigkeit von $19,9 \pm 1,3$ MPa. Werden die Proben mit dem Klimawechseltest gealtert zeigt sich für die niedrige und mittlere Vorbehandlungsintensität zu Beginn ein Abfall der Festigkeit, welcher über den Verlauf der Alterung nahezu konstant gehalten werden kann. Einzig der Ausreißer des L1_TP1a (60 Zyklen) folgt nicht dem zu erwartenden Verlauf. Eine Vorbehandlung der Oberflächen mit einer hohen Intensität (L3) bewirkt ein nahezu konstantes Alterungsverhalten im Klimawechseltest für das TP1a Material. Demgegenüber zeigt das TP2 Material eine größere Streuung der Zugscherfestigkeit nach der KTL-Trocknung. Die Festigkeit des TP2 Materials in Kombination mit L1 liegt lediglich bei $3,4 \pm 2,2$ MPa. Durch L2 können auch mit TP2 Festigkeiten auf dem Niveau von TP1a erreicht werden ($16,7 \pm 1,4$ MPa). Die höchste Vorbehandlungsintensität erreicht in Kombination mit TP2 die höchste Festigkeit von $24,8 \pm 3,0$ MPa. Im Gegensatz zu den Versuchen mit TP1a ist das TP2 Material anfälliger für eine Klimawechselalterung. So kann in Kombination mit L1 schon nach einer Klimawechselalterung von 30 Zyklen keine Festigkeit mehr erreicht werden. Dieses negative Alterungsverhalten wird durch die Vorbehandlung mit L2 zwar verbessert, da Festigkeiten nach 30 und 60 Zyklen ermittelt werden konnten, allerdings endet auch diese Versuchsreihe mit einem vollständigen Versagen der Verbindung nach 90 Zyklen. Erst die höchste hier betrachtete Vorbehandlungsintensität (L3) führt zu einem konstanten Alterungsverhalten der Verbindung in dem betrachteten Zeitraum. Die Ergebnisse der Zugscherversuche werden durch die Betrachtung ausgewählter Bruchbilder abgeschlossen (siehe Tab. 2).

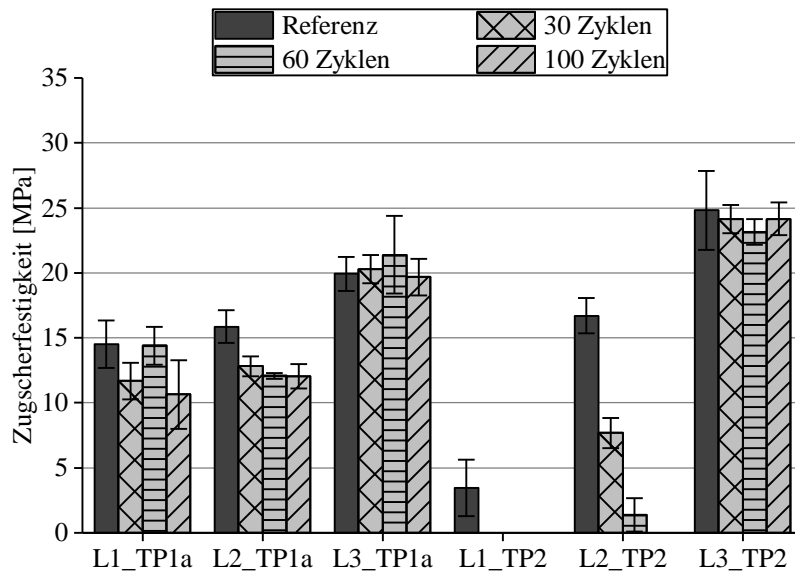


















Abb. 3: Zugscherergebnisse vor und nach Klimawechselalterung (zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten) entsprechend dem PV1200

Die Bruchbilder der TP1a Versuchsreihe zeigen für eine niedrige Vorbehandlungsintensität im Ausgangszustand ein kohäsives Versagen (CF) in Kombination mit einem Delaminationsversagen (DF) der TP FVK Füge­teile. Dieses Bruchbild verändert sich durch die Klimawechselalterung in ein rein kohäsives Versagensbild. Werden die Bruchbilder der höchsten Vorbehandlungsintensität betrachtet zeigt sich für die Versuchsreihe mit TP1a für nahezu alle Alterungszyklen ein DF in der ersten Faserlage des TP FVK. Lediglich nach 90 Zyklen verringern sich die Anteile des DF und es zeigt sich auch ein CF. Demgegenüber zeigt das TP2 Material für die Vorbehandlung mit L1 ein adhäsives Versagen (AF) bereits nach der KTL-Trocknung. Dies korreliert mit der geringen Festigkeit der Versuchsreihe. Diese Proben­serie wurde nicht aus der Alterung entnommen, durchlief also die vollen 100 Zyklen. An diesen Proben lässt sich deutlich die fortschreitende Unterwanderungskorrosion der Füge­stelle erkennen. Eine Steigerung der Vorbehandlungsintensität (L3) führt zu einer Mischung aus CF und DF mit schwankenden Anteilen, wie die Versuchsreihen nach 30 und 60 Zyklen erkennen lassen.

Tab. 3: Ausgewählte Bruchbilder der Zugscherproben vor und nach Klimawechselalterung

	Referenz	30 Zyklen	60 Zyklen	100 Zyklen
TP1a L1				
Bruchbild	CF/DF	CF	CF	CF
TP2 L1				
Bruchbild	AF	AF/CSF	AF/CSF	AF/CSF
TP1a L3				
Bruchbild	DF	DF	DF	CF/DF
TP2 L3				
Bruchbild	CF/DF	CF	CF/DF	CF/DF

4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der vorgestellten Klimawechselalterung zeigen, dass sich die Alterungsstabilität einer Verbindung durch die gezielte Oberflächenvorbehandlung mit Hilfe eines Lasers beeinflussen lässt. So erreicht das TP2 Material auf einer Oberfläche mit einer geringen Vorbehandlungsintensität keinen alterungsstabilen Zustand, wohingegen eine hohe Vorbehandlungsintensität zu keinen Einschränkungen der Verbindungsfestigkeit führt. Dies kann unter anderem mit der erhöhten Rauheit des L3 gegenüber dem Parameter L1 zusammenhängen. Im Vergleich des TP1a und TP2 Materials zeigt sich allerdings der große Einfluss der TP FVK Matrix für die Verbindungsausbildung, da dieses System im Vergleich bessere Alterungsergebnisse auf weniger rauen Oberflächen erzielt. Hier ist neben der mechanischen Adhäsion auch die spezifische Adhäsion zu berücksichtigen. Die bessere Adhäsion zeigt sich insbesondere beim Vergleich der Probenreihen die mit L1 vorbehandelt wurden. Hier zeigte TP1a

nahezu keine Veränderung des Bruchbildes, wohingegen beim TP2 Material deutliche Anzeichen von Unterwanderungskorrosion in der Bruchfläche zu erkennen sind. Hier wurde die Grenzschicht nicht ausreichend durch die Anbindung des TP FVK an die metallische Oberfläche geschützt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Alterungsstabilität einer Pressfügeverbindung zum einen vom gewählten TP FVK abhängt und zum anderen von der gewählten Vorbehandlungsintensität. Mit der höchsten hier betrachteten Vorbehandlungsintensität können aber für beide Materialien (TP1a und TP2) auch nach der Klimawechselalterung noch Festigkeiten auf dem Ausgangsniveau erzielt werden. Für die Zukunft ist eine weitere Untersuchung der Alterungsstabilität zum Beispiel mit einem Salzsprühnebeltest vorzunehmen, da diese in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit eine andere Anforderung an die hier vorgestellte Pressfügeverbindung (bzw. Laservorbehandlung) stellt. Daneben ist eine eingehende Betrachtung der TP Matrix anzustreben, um ein besseres Verständnis über den Einfluss von Modifikationen der PA 6 Matrix zu erreichen.

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (02PQ5100) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Forschungscampus "Open Hybrid Lab Factory" gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- [1] NEITZEL, Manfred ; MITSCHANG, Peter ; BREUER, Ulf: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014
- [2] ICKERT, Leif Herbert: *FVK-Metall-Hybridbauweise für die automobile Großserie*. Aachen : Forschungsges. Kraftfahrwesen Aachen (fka), 2014 (Schriftenreihe Automobiltechnik 169)
- [3] TENHAEFF, Katja ; DRECHSLER, Klaus: Hybrid structures of metals and fiber reinforced thermoplastics for chassis components. In: *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials : ECCM17 - 17th European Conference*

on Composite Materials, 26-30th June 2016, Munich, Germany. Augsburg : MAI Carbon Cluster Management GmbH, 2016

- [4] GUDE, Maik ; KUPFER, Robert ; KRAHL, Michael ; LIEBSCH, Alexander ; KUSHUKOW, Wikentij: *Hybridstrukturen für die Großserie*. In: *Jahresmagazin Kunststofftechnik* (2017), S. 80–86
- [5] FLEISCHER, Jürgen: *SPP1712 - Intrinsische Hybridverbunde für Leichtbaustrukturen*. URL <http://spp-1712-hybrider-leichtbau.de/> – Überprüfungsdatum 2018-08-20
- [6] SCHWINGENSCHLÖGL, Alex ; VERGHESE, Nikhil ; BRUCKBAUER, Philipp ; EHARD, Stefan ; DRECHSLER, Klaus: Towards thermoplastic carbon fiber reinforced plastics for the automotive industry - The need for and potential of fusion bonding and hybridization. In: *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials : ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 26-30th June 2016, Munich, Germany*. Augsburg : MAI Carbon Cluster Management GmbH, 2016
- [7] AGEORGES, C. ; YE, L.: *Fusion Bonding of Polymer Composites*. London : Springer London, 2002 (Engineering Materials and Processes)
- [8] HABENICHT, Gerd: *Kleben : Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Aufl. Berlin : Springer, 2009 (VDI)
- [9] BÜCHTER, Edwin: “*Cleaning with Light*”. In: *Laser Technik Journal* 15 (2018), Nr. 2, S. 36–39
- [10] HOSE, Ralf: *Laseroberflächenvorbehandlung zur Verbesserung der Adhäsion und Alterungsbeständigkeit von Aluminiumklebungen*. 1. Aufl. Aachen : Shaker, 2008 (Forschungsberichte des Instituts für Schweißtechnik Bd. 21)
- [11] FUCHS, Alexander N. ; WIRTH, Franz X. ; RINCK, Philipp ; ZAEH, Michael F.: *Laser-generated Macroscopic and Microscopic Surface Structures for the Joining of Aluminum and Thermoplastics using Friction Press Joining*. In: *Physics Procedia* 56 (2014), S. 801–810
- [12] HOPMANN, Christian ; MICHAELI, Walter: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. 8., aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2017
- [13] HÜMBERT, Martina: *Induktiver Schweißprozess für glasfaserverstärkte Thermoplaste und Stahl*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern : Technische Universität Kaiserslautern, 2018

[14]SCHEIK, Sven: *Untersuchungen des Verbundverhaltens von thermisch direkt gefügten Metall-Kunststoffverbindungen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen*. 2016. Aufl. Aachen : Shaker Verlag, 2016 (Aachener Berichte Fügetechnik Band 1/2016)

Autorenanschriften

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kristian Lippky

Dipl.-Ing. Malte Mund

Dr. rer. nat. Sven Hartwig

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Technische Universität Braunschweig

Institut für Füge- und Schweißtechnik

Langer Kamp 8

38106 Braunschweig

Telefon: 0531-39195501

Telefax: 0531-39195599

E-Mail: k.lippky@tu-braunschweig.de